ROYAUME DU MAROC

OFFICE MAROCAIN DE LA PROPRIETE
INDUSTRIELLE ET COMMERCIALE
---

(19)

المملكة المغربية

المكتب المغربي
للملكية الصناعية و التجارية
---

(12) BREVET D'INVENTION

(11) N° de publication :
MA 25407 A1

(43) Date de publication :
01.04.2002

(51) Cl. internationale :
F03D 9/00; H02K 3/28;
H02K 1/18

---

(21) N° Dépôt :
26365

(22) Date de Dépôt :
19.10.2001

(30) Données de Priorité :
26.05.1999 DE 199 23 925.8

(86) Données relatives à la demande internationale selon le PCT:
PCT/EP00/01882 03.03.2000

(71) Demandeur(s) :
WOBBEN ALOYS, ARGESTRASSE 19 26607 AURICH (DE)

(74) Mandataire :
M. MEHDI SALMOUNI-ZERHOUNI

---

(54) Titre : **MACHINE SYNCHRONE.**

(57) Abrégé : MACHINE SYNCHRONE.

MA 25407DE

MEMOIRE DESCRIPTIF

Joint à l'appui d'une demande de brevet d'invention ayant pour titre :

"Machine synchrone"

Déposant

WOBBEN ALOYS
Argestraße 19
26607 AURICH
ALLEMAGNE

Mandataire

M. Mehdi SALMOUNI-ZERHOUNI
Forum International
62 Boulevard d'Anfa
20000 CASABLANCA MAROC

****

01 AVR 2002

ABREGE

Les machines synchrones, utilisées sous forme de génératrice ou de moteur, génèrent des couples de rotation très élevés en cas de court-circuit au niveau des bornes de connexion ou à l'intérieur de la bobine du stator, par exemple. Ces pointes très élevées du couple de rotation en court-circuit peuvent atteindre des valeurs égales à six à huit fois la valeur du couple de rotation nominal de la machine synchrone. C'est pourquoi, le mode de construction mécanique des machines synchrones doit tenir compte du cas de court-circuit très rare et du couple de rotation très élevé qui en résulte.

L'objet de l'invention est de simplifier la construction de la machine synchrone et d'éviter les inconvénients ci-dessus mentionnés, par une machine synchrone munie d'un induit et d'un stator, dans laquelle le stator comporte au moins deux bobines à courant alternatif (triphasé) indépendantes, qui sont isolées électriquement et/ou physiquement l'une par rapport à l'autre.

Figure 3a

MACHINE SYNCHRONE

Les machines synchrones sont connues depuis longtemps dans de multiples formes. De telles machines synchrones utilisées sous forme de génératrice ou de moteur génèrent en cas de court-circuit, tel qu'un court-circuit au niveau des bornes de connexion ou à l'intérieur de la bobine du stator, des couples de rotation très élevés. Ces pointes très élevées du couple de rotation en court-circuit peuvent atteindre, dans ce cas, des valeurs égales à six à huit fois la valeur du couple de rotation nominal de la machine synchrone. C'est pourquoi, dans le mode de construction mécanique des machines synchrones, il faut tenir compte du cas, très rare, de court-circuit et du couple de rotation en court-circuit très élevé qui en résulte.

Les machines synchrones du type ci-dessus décrit sont utilisées depuis longtemps déjà dans les éoliennes de la société Enercon. Dans ce type d'éoliennes, les machines synchrones sont réalisées sous forme de génératrices à bagues collectrices, l'induit de la génératrice tournant à l'intérieur du stator de la génératrice et l'induit de la génératrice étant directement bridé contre le rotor de l'éolienne. Dans un induit de génératrice bridé directement à un moteur de propulsion, il se produit des couples de rotation très

élevés en cas de court-circuit ; de ce fait, les modes de construction visant à éviter des dommages relativement importants engendrent des coûts de fabrication et des coûts de maintenance très élevés.

C'est pourquoi, pour une machine synchrone, telle que celle utilisée dans l'éolienne de type E-40 de la société Enercon, on a développé et utilisé un dispositif de sécurité mécanique, conçu sous forme d'accouplement à boulons sectionnables. À cet effet, le support en étoile, qui maintient le stator (partie fixe de la génératrice), est assemblé par l'intermédiaire de boulons sectionnables avec le tourillon également fixe. En cas de court-circuit de la génératrice, les boulons se sectionnent et permettent d'entraîner le stator dans un mouvement de rotation autour du tourillon. De ce fait, le couple de rotation transmis est limité au maximum au quadruple de la valeur du couple de rotation nominal et, en cas de court-circuit de la génératrice, la sécurité de la ligne d'entraînement est garantie.

L'objet de l'invention est de simplifier la construction de la machine synchrone et d'éviter les inconvénients ci-dessus mentionnés.

Cet objet est résolu selon l'invention par une machine synchrone avec la caractéristique selon la revendication 1. Des modes de réalisation améliorés avantageux sont décrits dans les autres revendications.

L'invention se fonde sur le fait que des éléments de sécurité particuliers, tels qu'un accouplement à boulons sectionnables, ne sont pas nécessaires, si le couple de rotation en court-circuit maximum est limité à une fraction de la valeur habituelle. Dans la machine synchrone selon l'invention, le couple de rotation en court-circuit est de préférence toujours inférieur au double du couple de rotation.

Une caractéristique particulièrement préférée destinée à limiter le couple de rotation en court-

circuit réside dans le fait que le stator comporte au moins deux bobines à courant triphasé indépendantes, qui sont isolées l'une de l'autre électriquement et/ou physiquement. De ce fait, la puissance de la génératrice est répartie sur deux systèmes à courant triphasé différents. Dans deux systèmes à courant triphasé indépendants, chaque système accepte seulement 50 % de la puissance nominale. Par ailleurs, ces systèmes sont décalés d'un angle de 30°. Ainsi, les deux systèmes à courant triphasé sont isolés électriquement et mécaniquement (physiquement). Mais, de ce fait, la réactance X_d est aussi pratiquement doublée et le courant de court-circuit est ainsi divisé par deux. Cela présente l'avantage particulier qu'en cas de court-circuit dans un système, seule la moitié de la puissance en court-circuit peut apparaître. De ce fait, le couple de rotation maximum en court-circuit (court-circuit de deux phases, par exemple U1 et V1) peut être réduit de 50 % par rapport aux dispositifs à système unique utilisés habituellement jusqu'à présent.

Une autre mesure destinée à réduire le couple de rotation en court-circuit est de supprimer la cage amortisseuse, d'autant plus que les réactances X_d'' et X_d' déterminent l'évolution du courant de court-circuit dynamique. La suppression de la cage amortisseuse, donc l'utilisation d'une machine à pôles saillants, sans enroulement amortisseur, permet de réduire d'environ 30 % le couple de rotation maximum en court-circuit.

Dans une autre mesure destinée à réduire le couple de rotation, il est proposé que les bornes polaires de l'induit soient conçues pratiquement en forme de flèche. En cas de court-circuit dans l'un des deux systèmes à courant triphasé, le flux magnétique dans le pôle d'excitation peut alors très vite être dévié dans le sens de la rotation. On obtient ainsi un désaccouplement dynamique souple entre le flux d'excitation et le flux

du stator à l'intérieur d'un canal. Sur chaque largeur de pôle, le courant de court-circuit circule seulement dans deux des six canaux au total. Ce désaccouplement dynamique du flux d'excitation réduit également le couple de rotation en court-circuit.

L'invention est expliquée en détail ci-après à l'appui d'un exemple de réalisation représenté sur les dessins. Le dessin montre :

la figure 1, une coupe transversale d'une nacelle d'éolienne selon l'invention, équipée d'une génératrice synchrone selon l'invention ;

la figure 2, une coupe transversale d'une nacelle d'éolienne connue, équipée d'une génératrice synchrone connue ;

la figure 3a, une représentation partielle d'une génératrice synchrone selon l'invention ;

la figure 3b, une esquisse de la répartition des conducteurs de phase ;

la figure 3c, une représentation partielle d'une génératrice synchrone connue ;

la figure 4a, une vue d'une borne polaire en forme de flèche ;

la figure 4b, une vue de dessus d'une borne polaire en forme de flèche ;

la figure 5, une courbe du flux magnétique sans court-circuit ;

la figure 6, une courbe du flux magnétique avec court-circuit ;

les figures 7 et 8, des mesures prises en cas de court-circuit en présence d'une charge partielle ou d'une pleine charge.

La figure 1 représente une partie d'une nacelle d'éolienne équipée d'un rotor 1, qui est logé sur un tourillon 2. Le rotor est relié sans boîte de vitesse directement à un induit d'une génératrice synchrone. L'induit de la génératrice est situé à l'intérieur du

stator 3, qui est bridé directement contre le tourillon 2. Le tourillon 2, tout comme l'ensemble de la ligne d'entraînement logée sur celui-ci, y compris la génératrice, sont maintenus par le support de la machine 4. En outre, la figure représente également le moyeu du rotor 5 et des paliers 6.

La figure 2 représente une nacelle d'éolienne équipée d'une génératrice synchrone connue, dans laquelle le stator 1 est maintenu par un support en étoile 7, et le support en étoile 7 est lui-même monté sur le tourillon 2 et bloqué au moyen d'un accouplement à boulons sectionnables 8.

En cas de court-circuit, par exemple au niveau des bornes de connexion ou également à l'intérieur de la bobine du stator (non représentée), des couples de rotation très élevés sont générés dans la génératrice synchrone. Ces pointes très élevées des couples de rotation en court-circuit, qui peuvent atteindre des valeurs égales à six à huit fois (voire davantage) la valeur du couple de rotation nominal, doivent être prises en compte dans le mode de construction mécanique. Dans une éolienne de type E-40 de la société Enercon, représentée sur la figure 2, ce mode de construction mécanique utilise un dispositif de sécurité mécanique, conçu sous forme d'accouplement à boulons sectionnables 8. En cas de court-circuit dans la génératrice, les boulons se sectionnent et permettent d'entraîner le stator 3 dans un mouvement de rotation autour du tourillon 2. De ce fait, le couple de rotation transmis est limité à une valeur égale au maximum au quadruple de la valeur du couple de rotation nominal. Ainsi, dans le cas d'un court-circuit de la génératrice, la sécurité de la ligne d'entraînement est garantie.

La figure 3a représente une coupe transversale d'une vue partielle d'un machine synchrone selon l'invention (génératrice synchrone). De plus, l'induit

tourne à l'intérieur du stator et la machine à pôles saillants ne comporte pas de cage amortisseuse (enroulement amortisseur) et pas de bague collectrice.

En outre, deux bobines à courant triphasé indépendantes U1, V1, W1 et U2, V2, W2 sont montées dans le stator. La puissance de la génératrice est ainsi répartie sur les deux bobines à courant triphasé (systèmes à courant triphasé), de telle sorte que chaque système à courant triphasé accepte seulement 50 % de la puissance nominale. Les deux systèmes à courant triphasé sont décalés d'un angle électrique de 30° et sont donc isolés l'un de l'autre électriquement et mécaniquement (physiquement). Mais, de ce fait, la réactance X_d est aussi pratiquement doublée et le courant de court-circuit est ainsi divisé par deux. Cela présente l'avantage qu'en cas de court-circuit dans un système à courant triphasé, seule la moitié de la puissance du court-circuit peut apparaître. De ce fait, il est possible de réduire le couple de rotation maximum en court-circuit (court-circuit de deux phases, par exemple U1 et V1) de 50 % par rapport à un dispositif à un seul système (état de la technique). La figure 3b présente dans une vue plus claire, la disposition de chaque phase des deux systèmes à courant triphasé différents sur une plus grande zone du stator.

La figure 3c représente une coupe transversale d'une vue partielle d'une génératrice synchrone connue (machine synchrone conçue sous forme de machine à pôles lisses avec cage amortisseuse) (type E-40), dans laquelle l'induit de la génératrice est muni d'une cage amortisseuse et la puissance de la génératrice est acceptée par un seul système à courant triphasé U, V, W. La figure représente : le noyau polaire 9, la bague collectrice 10, les barres de la cage amortisseuse 11, la lame du stator 12.

Les épanouissements polaires et bornes polaires, qui sont logés sur les noyaux polaires de l'induit - comme il est représenté sur la figure 3a - sont réalisés en forme de flèche, comme il est représenté sur la figure 4. De plus, la borne polaire - figure 4b - présente sur une vue de dessus la forme d'une flèche sur la surface orientée vers la zone de discontinuité magnétique. Le bord avant, par référence au sens de déplacement de l'induit qui est représenté par une flèche sur la figure 3a, comporte deux parties de bordure disposées en angle l'une par rapport à l'autre et se rejoignant en formant une pointe, lesquelles parties sont disposées en oblique par référence au sens de déplacement de l'induit et, de ce fait, des bornes polaires. Les parties de bordure sont disposées en formant un angle de 150° environ par référence au sens de déplacement de l'induit. Le bord arrière d'une borne polaire, par référence au sens de déplacement de l'induit, comporte également des parties de bordure disposées en oblique, par référence au sens de déplacement de l'induit.

La figure 5 représente le flux magnétique dans la génératrice selon l'invention (induit -> stator) sans court-circuit. Dans le cas présent, le flux magnétique passe de manière homogène entre les canaux en suivant un trajet direct de la borne polaire vers le stator.

En cas de court-circuit - figure 6 - dans un canal - repéré ici en U2 - les lignes de champ magnétique (flux magnétique Φ) doivent être déviées. La forme en flèche des bornes polaires permet une déviation à l'intérieur du pôle vers la droite et vers la gauche, de telle sorte que le flux magnétique peut se répartir sur d'autres languettes de canal contiguës. Du fait que le flux magnétique est dévié dans le pôle d'excitation dans le sens de rotation, on obtient un désaccouplement dynamique souple entre le flux d'excitation et le flux

du stator à l'intérieur d'un canal. Sur la largeur de chaque pôle, le courant de court-circuit circule seulement dans deux des six canaux au total. Ce désaccouplement dynamique du flux d'excitation réduit également le couple de rotation en court-circuit.

Les figures 7 et 8 illustrent à titre d'exemple des séries de mesures du couple de rotation du rotor, de la puissance et de la vitesse de rotation d'une génératrice synchrone de 1,5 MW (type E-66, société Enercon) dans le cas d'une charge partielle (1 200 kW) et d'une pleine charge (1 500 kW) et dans le cas d'un court-circuit produit artificiellement dans la génératrice. Les mesures montrent que, quel que soit l'état de fonctionnement, le couple de rotation maximum dû à un court-circuit dans une génératrice à deux phases est nettement inférieur au double du couple nominal.

Comme il est décrit, la combinaison de plusieurs mesures - au moins deux systèmes à courant triphasé indépendants, suppression de la cage amortisseuse, des bornes polaires en forme de flèche - permet de réduire de manière drastique le couple de rotation en court-circuit, ce qui est particulièrement très avantageux dans une génératrice destinée à des éoliennes. En corrélation avec la diminution du couple de rotation en court-circuit, il est aussi possible de simplifier la construction de la génératrice, étant donné que l'ensemble de la construction de support du stator - figure 1 - peut être nettement simplifiée par rapport aux solutions connues jusqu'à présent - figure 2.

REVENDICATIONS

1. Éolienne comprenant une machine synchrone munie d'un induit et d'un stator, dans laquelle le stator comporte au moins deux bobines à courant alternatif (triphasé) indépendantes, qui sont isolées l'une par rapport à l'autre électriquement et/ou physiquement.

2. Machine synchrone selon la revendication 1, caractérisée en ce que l'induit ne comporte pas de cage amortisseuse ou pas d'enroulement amortisseur.

3. Machine synchrone en particulier selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que la machine synchrone comporte des moyens, par lesquels le couple de rotation, généré en cas de court-circuit sur la bobine du stator, est toujours limité au maximum au quadruple de la valeur du couple de rotation nominal, de préférence au double de la valeur du couple de rotation nominal.

4. Machine synchrone selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que le couple de rotation en court-circuit est toujours inférieur au double du couple de rotation nominal.

5. Machine synchrone selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que l'induit comporte des épanouissements polaires conçus sensiblement en forme de flèche.

6. Machine synchrone en particulier selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que l'induit et le stator sont maintenus par un tourillon commun et le stator est directement bridé contre le tourillon.

7. Machine synchrone selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que le stator est maintenu par un support, en ce que l'induit de la machine synchrone et le support sont maintenus par un tourillon fixe et en ce que le support et le tourillon sont réalisés en une seule unité de construction.

8. Machine synchrone selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que la machine synchrone est une génératrice synchrone et/ou le support du stator et le tourillon sont réalisés sous forme de composant en acier moulé, réalisé en une seule pièce.

9. Machine synchrone selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce qu'aucun élément de sécurité mécanique n'est réalisé entre le stator et le tourillon, lequel élément débloque le stator en cas de court-circuit.

10. Machine synchrone selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que le premier système à courant triphasé est décalé d'un angle (électrique) de 30° environ par rapport au deuxième système à courant triphasé.

11. Machine synchrone selon l'une quelconque des revendications précédentes, avec une puissance de 100 kW au moins, de préférence avec une puissance de 500 kW à 10 MW.

12. Dispositif de production d'énergie électrique comprenant une machine synchrone selon l'une quelconque des revendications précédentes.

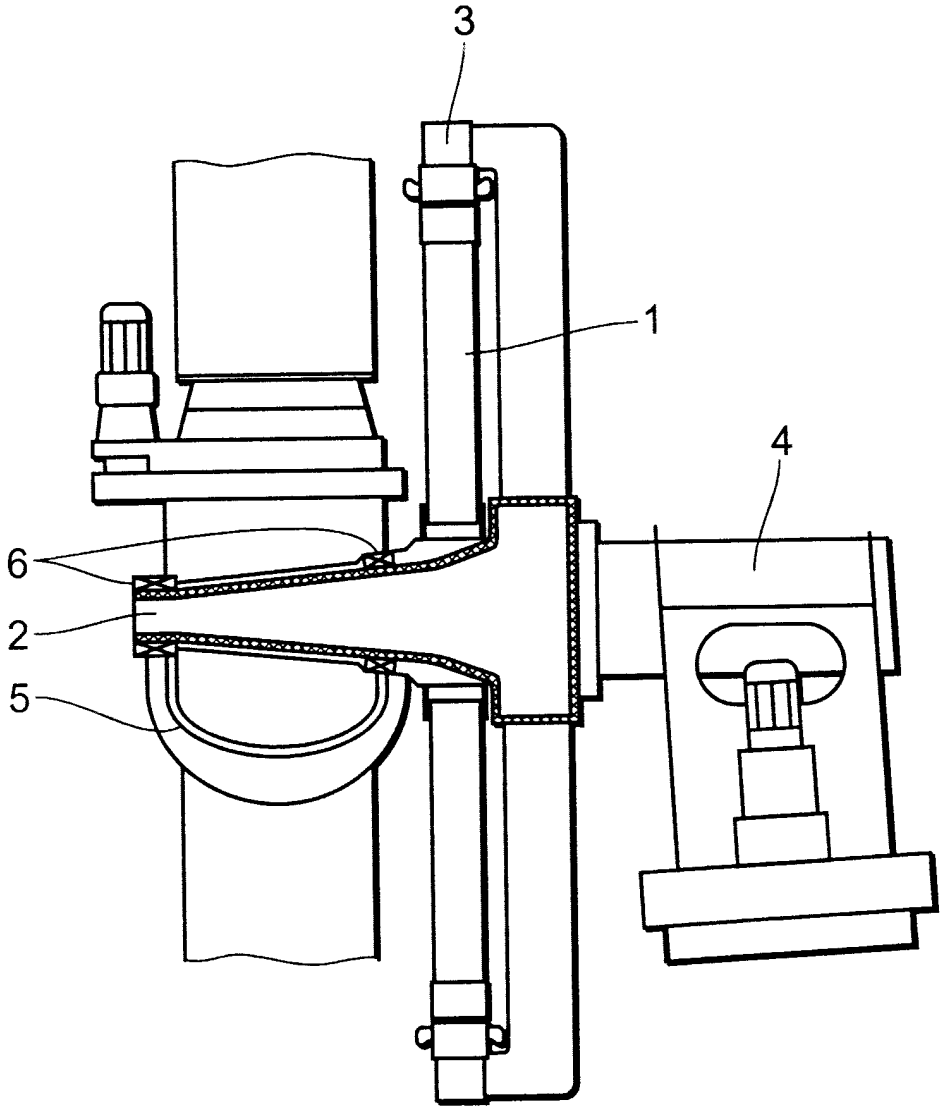

Fig. 1

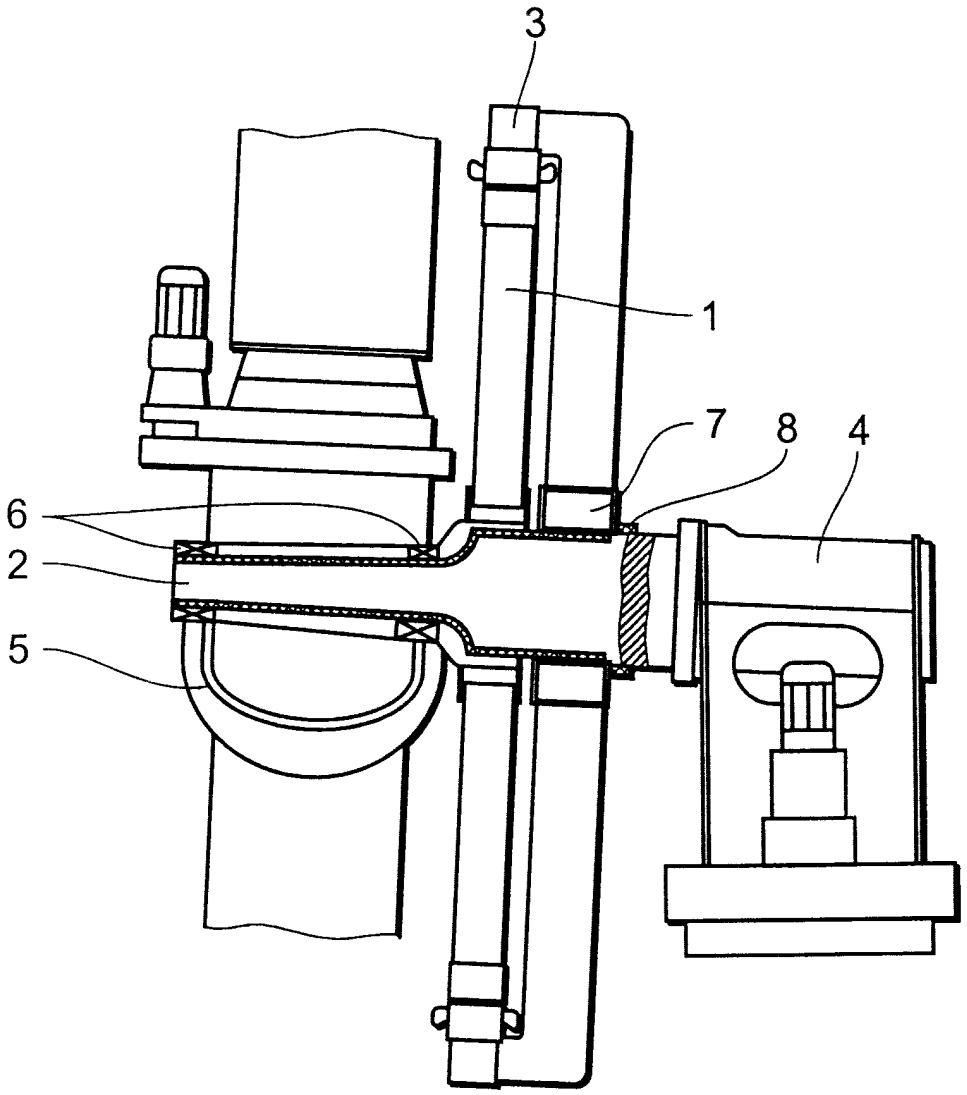

Fig. 2

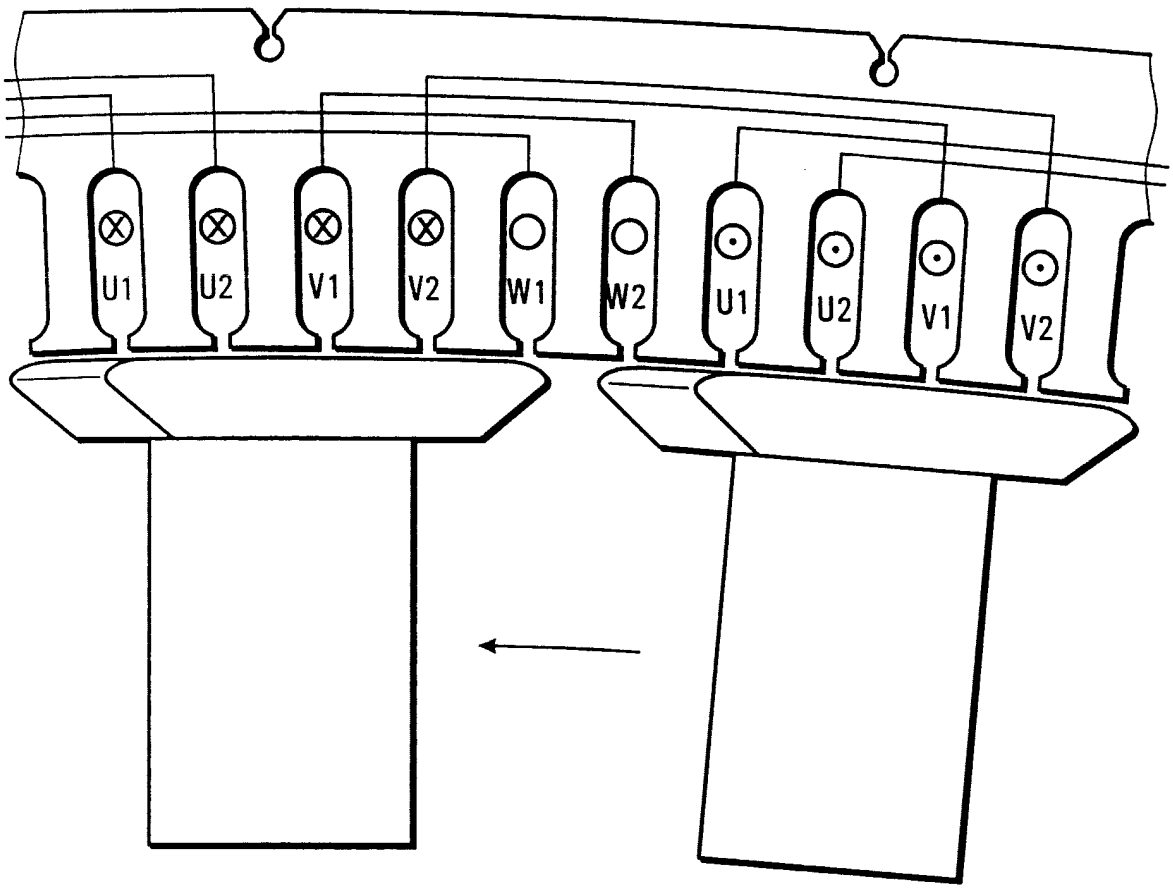

Fig. 3a

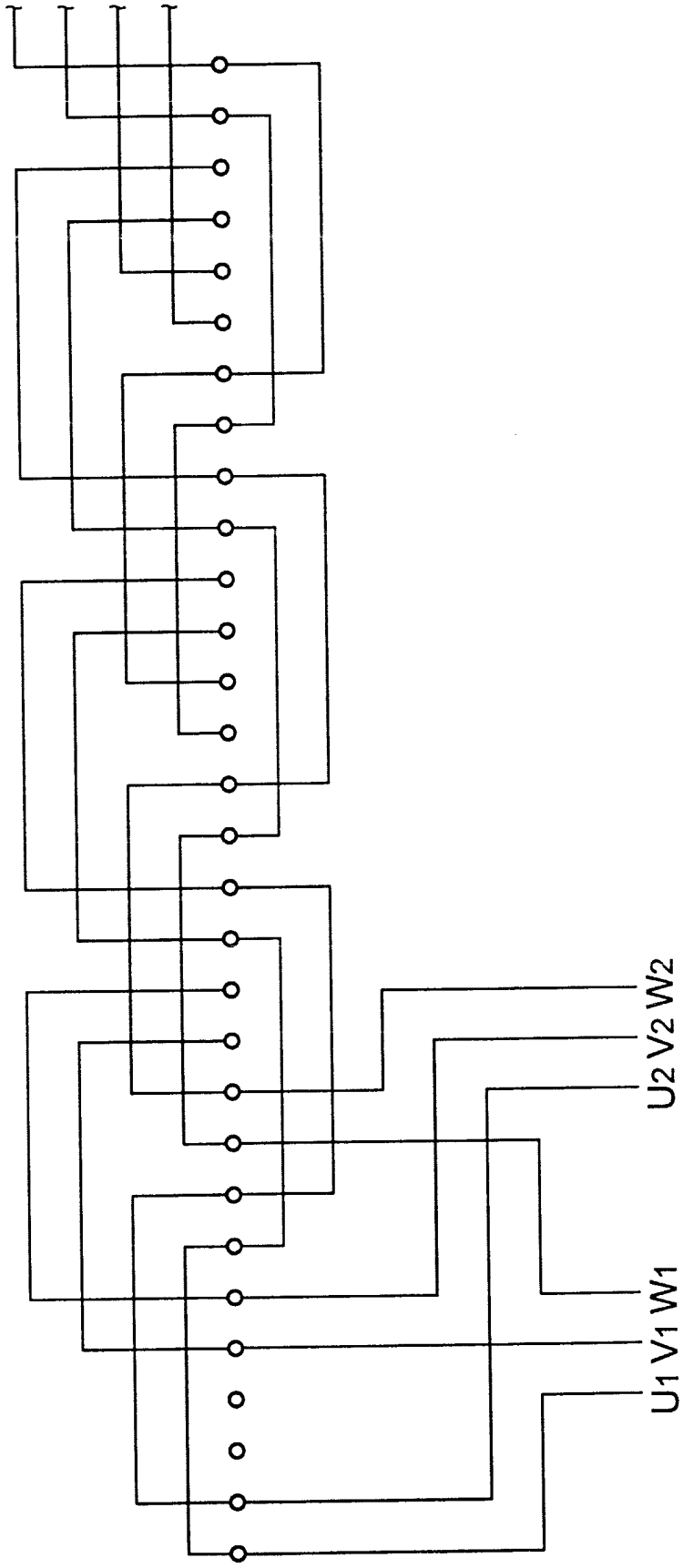

Fig. 3b

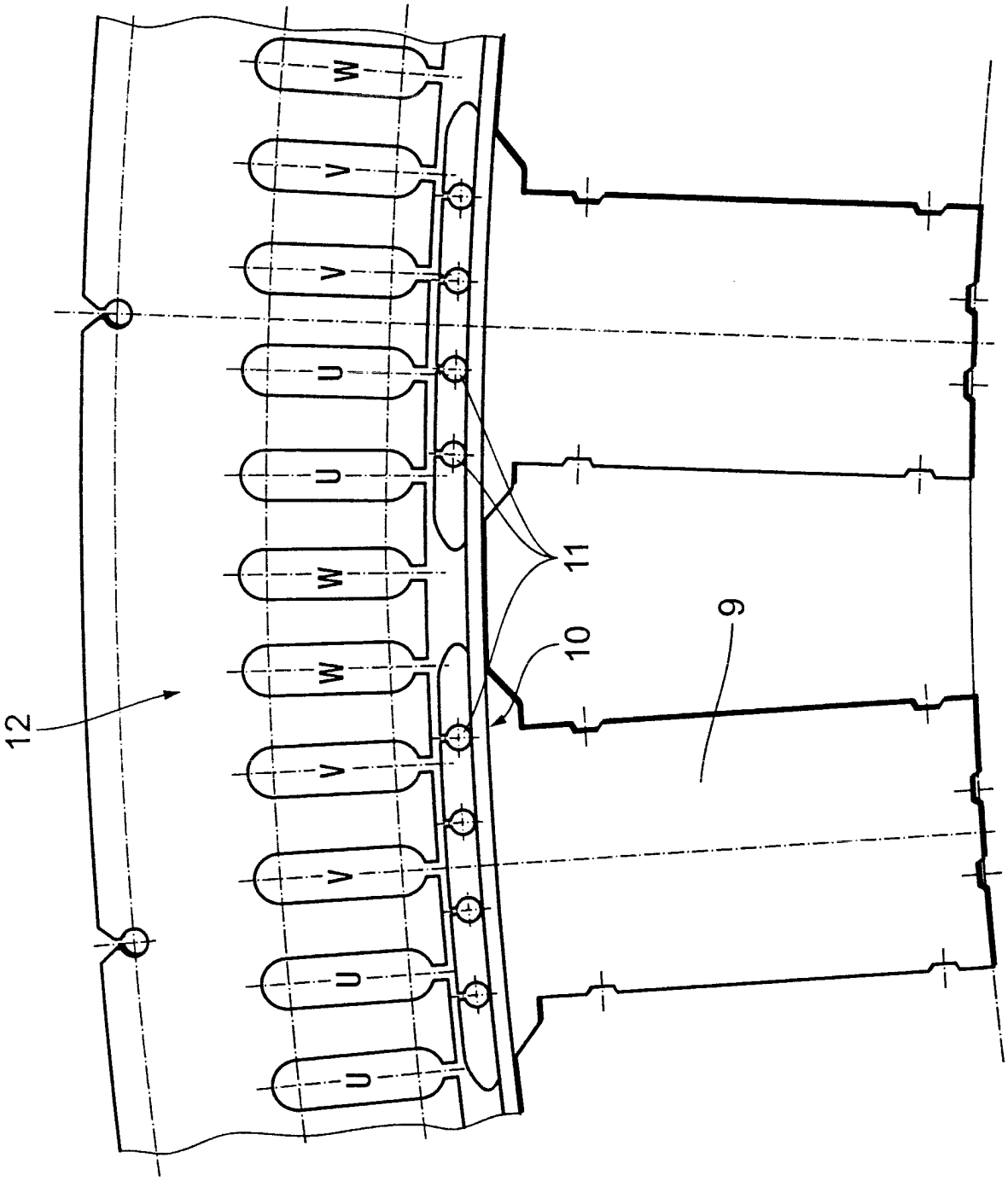

Fig. 3c

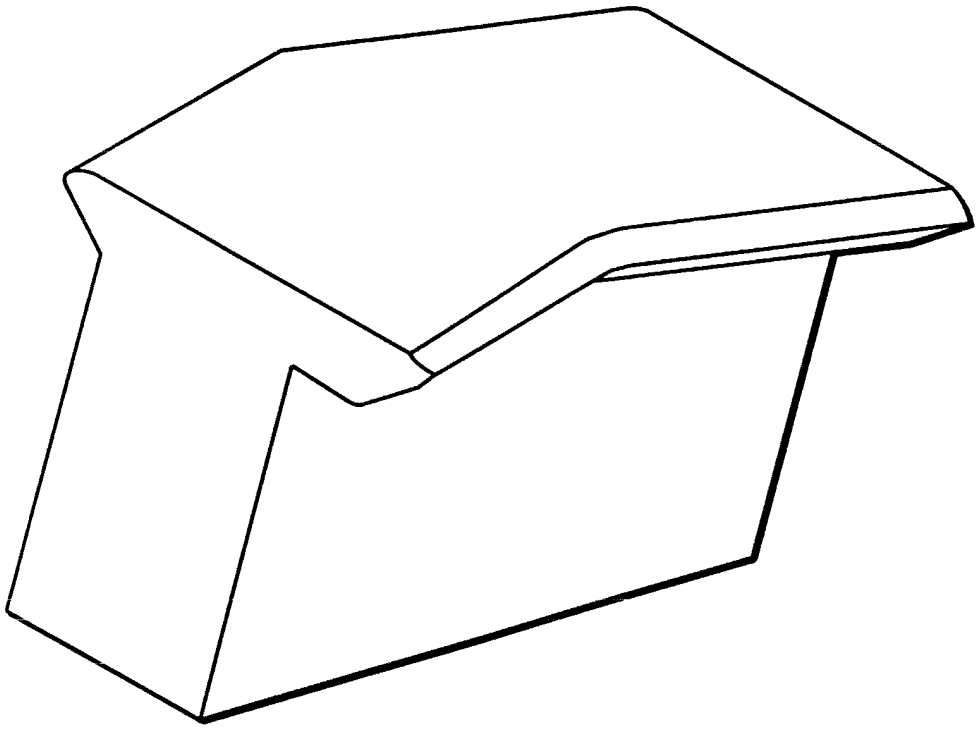

Fig. 4a

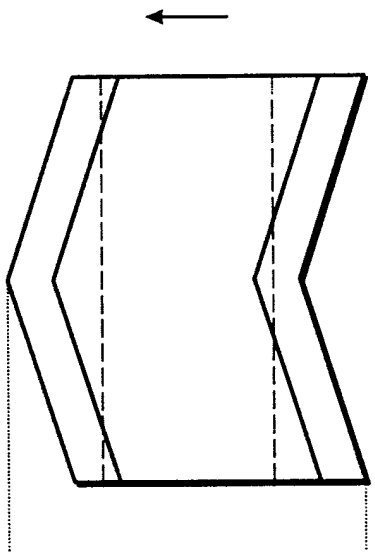

Fig. 4b

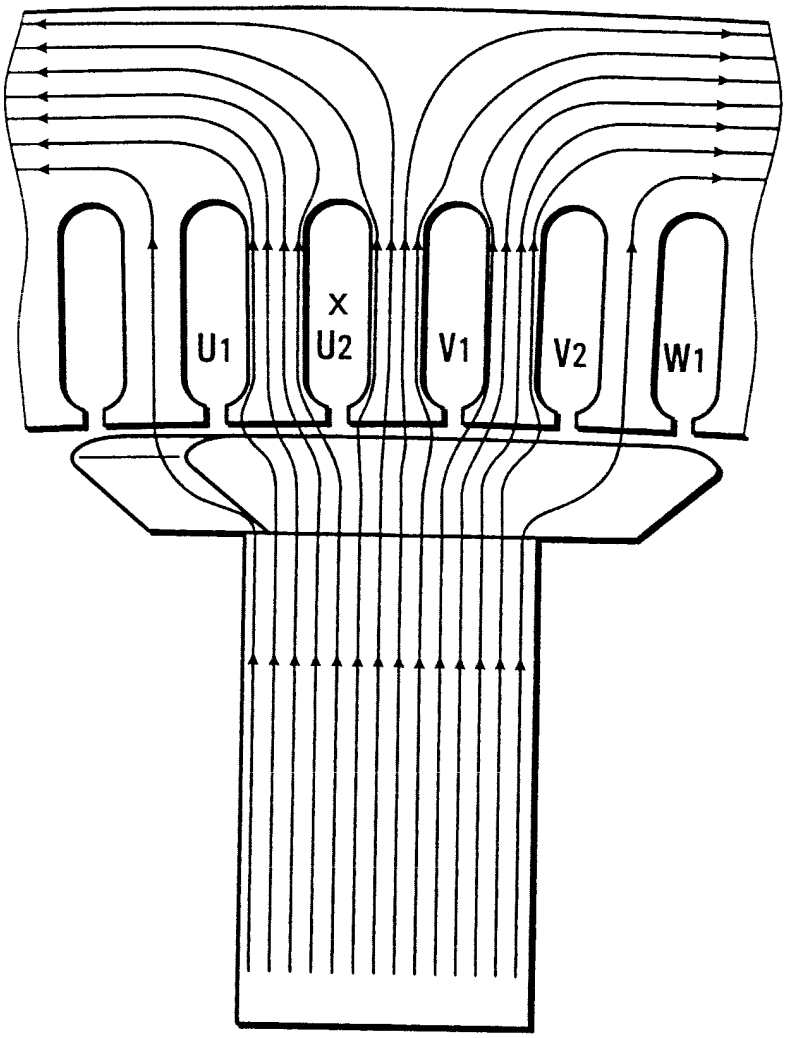

Fig. 5

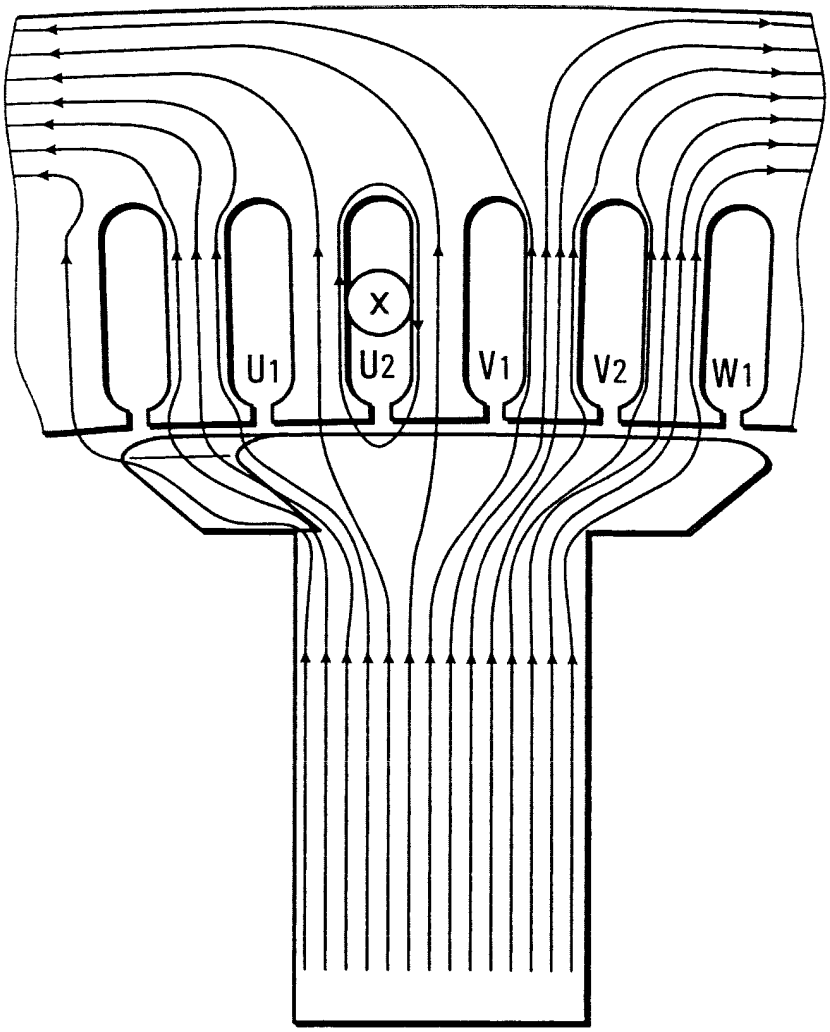

Fig. 6

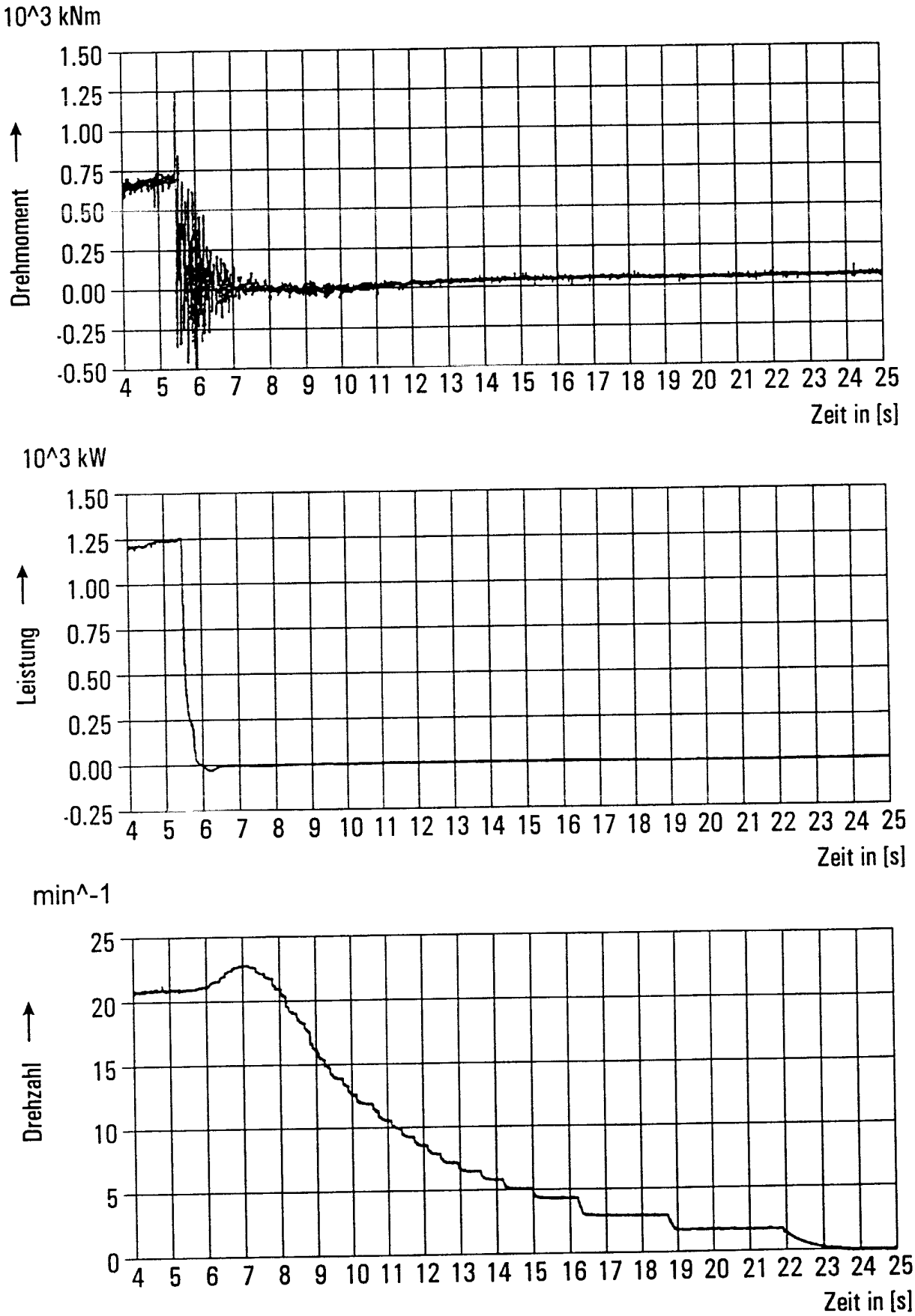
10^3 kNm
Drehmoment
1.50
1.25
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
-0.50
4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
Zeit in [s]
10^3 kW
Leistung
1.50
1.25
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
Zeit in [s]
min^-1
Drehzahl
25
20
15
10
5
0
4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
Zeit in [s]

Fig. 7

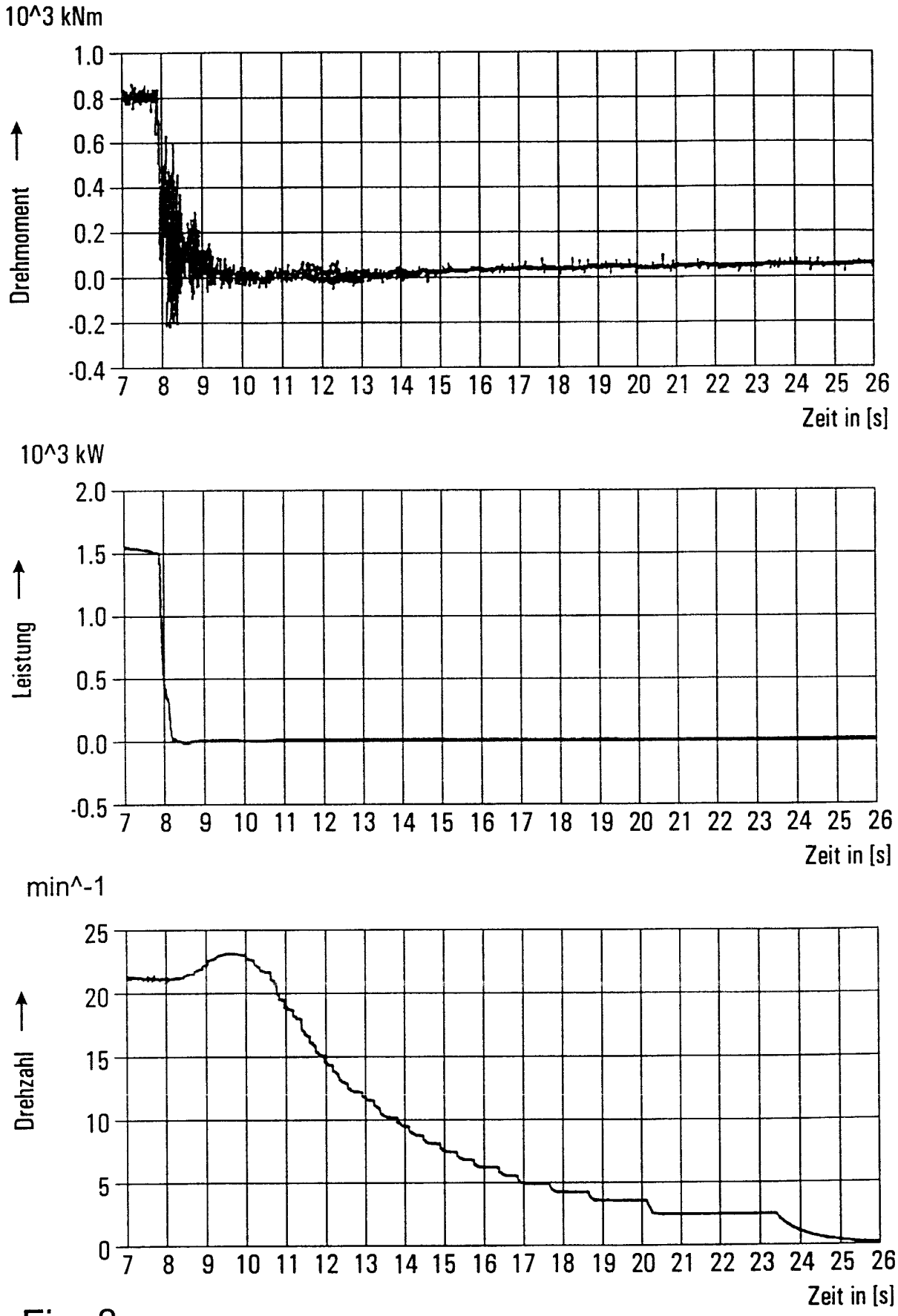
10^3 kNm
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
-0.2
-0.4
Drehmoment
7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26
Zeit in [s]
10^3 kW
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
Leistung
7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26
Zeit in [s]
min^-1
25
20
15
10
5
0
Drehzahl
7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26
Zeit in [s]

Fig. 8